

<https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-04>

УДК 504.4.064:528.88:355.4

В. О. МАКСИМЕНКО,

аспірант кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи

e-mail: maksymenko.vladyslav.o@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5525-2438>

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ SENTINEL-2 ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

Мета. Наукове обґрунтування можливостей використання даних Sentinel-2 як компенсаційного компонента екологічного моніторингу поверхневих вод України в умовах воєнного стану.

Методи. Концептуально-аналітичний характер дослідження поєднує структурно-функціональний аналіз традиційної системи моніторингу поверхневих вод, порівняльну оцінку контактних і дистанційних методів спостереження, аналіз вимог Водної рамкової директиви ЄС, технічну інтерпретацію можливостей мультиспектрального сенсора Sentinel-2 MSI та демонстраційний аналіз супутникових сцен зони Каховського водосховища

Результати. Для ілюстрації компенсаційного потенціалу дистанційного зондування Землі використано сцени Sentinel-2 L2A до та після руйнування Каховської греблі, зокрема візуалізації у режимі True color і розрахунок NDWI для виділення залишкових водних масивів та трансформованих руслових елементів. Визначено три основні виміри прогалини екологічних даних, що виникає в умовах війни: просторовий, часовий та аналітичний. Показано, що Sentinel-2 не замінює лабораторний контроль якості води, але може забезпечувати регулярний просторово-часовий скринінг великих водних об'єктів, оперативне виявлення змін водної поверхні, картографування зон затоплення або висихання, попередню індикацію каламутності та визначення ділянок для пріоритетної польової валідації. На прикладі Каховського водосховища продемонстровано, що супутникові сцени дозволяють фіксувати масштабну трансформацію водного об'єкта після втрати наземного доступу, зокрема спрацювання водосховища, оголення донних відкладів і формування залишкових водойм.

Висновки. Найбільш обґрунтованою для воєнного та повоєнного періодів є інтегрована модель моніторингу, у якій Sentinel-2 виконує функцію компенсаційного просторово-часового контуру, індексний аналіз забезпечує первинне виявлення змін, машинне навчання може підтримувати автоматизовану класифікацію сцен після належної валідації, а лабораторний контроль залишається основою метрологічно підтверженої оцінки якості води.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: екологічний моніторинг, поверхневі води, Sentinel-2, дистанційне зондування Землі, воєнний стан, NDWI

Як цитувати: Максименко В. О. Використання даних Sentinel-2 для компенсаційного моніторингу поверхневих вод України в умовах воєнного стану. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2026. Вип. 34. С. 54-65. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-04>

In cites: Maksymenko, V. O. (2026). Use of Sentinel-2 data for compensatory monitoring of surface waters of Ukraine under martial law. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (34), 54-65. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2026-34-04> (in Ukrainian)

Вступ

Систематичний моніторинг поверхневих вод є базовою передумовою екологічної безпеки, раціонального водокористування, захисту здоров'я населення та виконання міжнародних природоохоронних зобов'язань. Результати такого моніторингу використовую-

ються для оцінювання екологічного і хімічного стану водних масивів, виявлення джерел забруднення, планування природоохоронних заходів, управління ризиками водопостачання та підготовки державної звітності. У Водній рамковій директиві ЄС 2000/60/ЄС регулярний

© Максименко О. В., 2026



[This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

моніторинг розглядається як один із ключових інструментів запобігання подальшому погіршенню стану водних екосистем [1], а у настановах ВООЗ контроль водних джерел є складником системи управління ризиками для здоров'я населення [2].

В Україні традиційна система моніторингу поверхневих вод значною мірою спирається на стаціонарні пункти спостереження, польовий відбір проб, транспортування зразків і лабораторний аналіз. Такий підхід забезпечує високу доказовість для окремих фізико-хімічних, гідробіологічних і токсикологічних показників, однак критично залежить від безпечного доступу до контрольних створів, працездатності лабораторій, транспортної логістики, наявності персоналу та стабільних каналів передавання даних. У мирних умовах ця залежність є прийнятною, оскільки вона компенсується регулярністю польових робіт і контрольованістю процедур. Водночас нормативною основою водного моніторингу в Україні залишається Водний кодекс України, який визначає правові засади використання, охорони та відтворення водних ресурсів [3]. В умовах повномасштабної війни залежність моніторингової системи від безпечного наземного доступу перетворюється на системну вразливість.

Після початку повномасштабної збройної агресії проти України значна частина територій опинилася у зоні бойових дій, тимчасової окупації або підвищеної мінної небезпеки. Для системи екологічного моніторингу це означає не лише зменшення кількості вимірювань, а й розрив у всьому ланцюзі формування екологічних даних: від доступу до пункту спостереження до лабораторного підтвердження результатів. У документах UNECE щодо оцінювання екологічних збитків в Україні підкреслено, що супутникові спостереження особливо важливі в ситуаціях, коли наземне обстеження є небезпечним або неможливим [4].

Руйнування Каховської ГЕС 6 червня 2023 року стало граничним прикладом ситуації, у якій виключно наземна модель моніторингу не могла забезпечити оперативне, безпечне і просторово повне спостереження. Катастрофа спричинила різке спрацювання водосховища, затоплення територій нижче за течією, оголення великих площ донних відкладів, зміну гідрологічного режиму нижнього Дніпра та переміщення завислих речовин і забруднювачів [5–8]. Окремі дослідження також показали біогеохімічну реакцію північно-

західної частини Чорного моря на надходження водних і завислих мас після руйнування греблі [9].

Дистанційне зондування Землі створює додатковий інформаційний контур, який не потребує фізичного доступу до території спостереження. Місія Sentinel-2 програми Copernicus забезпечує регулярне отримання мультиспектральних зображень, придатних для аналізу водної поверхні, берегової лінії, зон затоплення, каламутних шлейфів, оголених донних відкладів і непрямих ознак евтрофікації [10–12]. Водночас супутникові дані не є повним еквівалентом лабораторного моніторингу: вони не визначають безпосередньо концентрації важких металів, хлороорганічних сполук, нітратів або мікробіологічних показників [13–15].

Наукове значення роботи полягає в узагальненні можливостей застосування даних Sentinel-2 для просторово-часового моніторингу поверхневих вод за умов обмеженого або втраченого доступу до наземних пунктів спостереження. Запропоновано підхід до поєднання даних ДЗЗ, індексного аналізу, методів машинного навчання та лабораторного контролю з розмежуванням їхніх функцій у системі моніторингу. Супутникові дані можуть забезпечувати просторовий скринінг і виявлення змін, спектральні індекси – підтримувати первинну інтерпретацію стану водних об'єктів, машинне навчання – використовуватися для автоматизованої класифікації сцен після навчання й валідації, тоді як лабораторні дослідження залишаються необхідними для підтвердження показників якості води.

Практичне значення роботи пов'язане з можливістю використання відкритих супутникових даних для попереднього оцінювання змін стану поверхневих вод за умов обмеженого доступу до окремих територій. Такий підхід може доповнювати традиційні спостереження, сприяти плануванню польових обстежень, підготовці картографічних матеріалів і формуванню аналітичної інформації для потреб екологічного управління.

Метою дослідження є обґрунтування можливостей використання даних Sentinel-2 як компенсаційного компонента екологічного моніторингу поверхневих вод України в умовах воєнного стану та демонстрація їх застосування на прикладі супутникових сцен зони Каховського водосховища до і після руйнування греблі.

Об'єкти та методи дослідження

Об'єктом дослідження є система екологічного моніторингу поверхневих вод України в умовах обмеженого або втраченого наземного доступу, зокрема, водні об'єкти Дніпровського басейну, що зазнали впливу бойових дій, окупації територій, мінної небезпеки та руйнування гідротехнічної інфраструктури.

Предметом дослідження є можливості використання супутникових даних Sentinel-2 для підтримки просторово-часового спостереження за поверхневими водами, виявлення змін водної поверхні, індикації зон підвищеної каламутності та формування компенсаційного інформаційного контуру в умовах, коли регулярні наземні спостереження є неможливими або істотно обмеженими.

Дослідження орієнтоване на обґрунтування підходу до інтеграції відкритих супутникових даних, індексного аналізу та аналітичної інтерпретації в систему спостереження за поверхневими водами. Використані супутникові сцени розглядаються як приклад практичного застосування такого підходу для територій, де регулярне наземне спостереження ускладнене. У межах роботи дані ДЗЗ трактуються насамперед як засіб просторового скринінгу, попереднього виявлення змін і визначення ділянок, що потребують подальшої уваги. Така інтерпретація дозволяє коректно поєднувати дистанційні індикатори з традиційними методами екологічного контролю, не ототожнюючи спектральні показники з лабораторними характеристиками якості води.

Дослідження побудовано на поєднанні кількох аналітичних напрямів: розгляду структури та функцій традиційної системи моніторингу поверхневих вод, порівняння контактного і дистанційного підходів, аналізу вимог Водної рамкової директиви ЄС та української нормативної бази, а також оцінювання можливостей Sentinel-2 MSI для спостереження за водними об'єктами. Для ілюстрації запропонованого підходу використано супутникові сцени зони Каховського водосховища. Узагальнення цих складників дало змогу окреслити схему поєднання ДЗЗ, індексного аналізу, машинного навчання та контрольованої аналітичної звітності.

Технічна оцінка Sentinel-2 ґрунтувалася на офіційних характеристиках ESA і Copernicus Data Space Ecosystem. Сенсор MSI реєструє дані у 13 спектральних каналах у

діапазоні 443–2190 нм, має смугу зйомки 290 км, просторову роздільну здатність 10, 20 і 60 м залежно від каналу та п'ятиденну повторюваність для двосупутникової конфігурації [10, 11]. Для водного моніторингу найбільш релевантними є канали видимого спектра, ближнього інфрачервоного діапазону, Red Edge та SWIR, які можуть використовуватися для розмежування води й суходолу, аналізу завислих речовин, індикації потенційної евтрофікації та картографування змін берегової лінії [12–17].

Як базові індикатори розглянуто NDWI, NDTI і NDCI. NDWI розраховується за співвідношенням зеленого та ближнього інфрачервоного каналів і використовується для виділення відкритої водної поверхні [18]. Його модифікація MNDWI може застосовуватися для підсилення водних об'єктів у забудованих або спектрально складних умовах [19]. У цій роботі базовим індексом для демонстраційного кейсу обрано NDWI:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR).$$

Для Sentinel-2 у типовій реалізації NDWI може бути розрахований із використанням каналу B3 як Green та B8 як NIR. NDTI використовується для оцінювання відносної просторової мінливості каламутності за червоним і зеленим каналами [17, 20]:

$$NDTI = (Red - Green) / (Red + Green).$$

NDCI застосовується як непрямий індикатор хлорофілу-а та потенційних евтрофікаційних процесів з використанням червоного та Red Edge каналів [16, 21]:

$$NDCI = (Red\ Edge - Red) / (Red\ Edge + Red).$$

Для демонстраційного кейсу використано сцени Sentinel-2 L2A зони Каховського водосховища, отримані через Copernicus Browser: сцену до руйнування греблі від 25.05.2023 та сцену після руйнування від 25.06.2023. Візуальний аналіз виконано у режимі True color для якісного зіставлення стану водного дзеркала до і після події. Для післяаварійної сцени також використано NDWI-візуалізацію, що дозволяє контрастно виділити залишкові водні масиви, заболочені ділянки та нові руслові елементи. Зазначені сцени застосовано як ілюстративний приклад

просторової трансформації водного об'єкта, а не як повну кількісну оцінку площі водної поверхні або хімічного стану води.

Концептуальне моделювання інтегрованої системи виконано з урахуванням трьох рівнів: супутникового, аналітичного та звітного. Супутниковий рівень забезпечує отримання і попередню обробку Sentinel-2; аналітичний рівень виконує індексний аналіз і потенційну

класифікацію сцен; звітний рівень формує структуровану інтерпретацію з посиланням на джерела. Vision Transformer розглянуто як перспективну архітектуру для класифікації мультиспектральних сцен [22, 23], а Retrieval-Augmented Generation — як інструмент контрольованого формування звітів із прив'язкою до джерел, а не як засіб валідації екологічних вимірювань [24].

Результати та обговорення

Аналіз функціональної структури наземного моніторингу показує, що його стійкість визначається не лише наявністю пунктів спостереження, а й безперервністю всього операційного ланцюга: доступ до створу, відбір проб, транспортування, лабораторний аналіз, контроль якості, передавання та інтерпретація даних. Порушення будь-якого з цих елементів знижує придатність результатів для управлінських рішень.

В умовах війни формується не одична відсутність даних, а системна прогалина. Просторовий вимір полягає у втраті регулярного контролю над частиною водних об'єктів, зокрема на окупованих, прифронтових або замінюваних територіях. Часовий вимір проявляється у неможливості забезпечити достатню частоту спостережень для швидкоплинних процесів, таких як аварійні скиди, паводки, формування каламутних шлейфів або різкі зміни водності. Аналітичний вимір пов'язаний із дефіцитом лабораторно підтверджених показників, необхідних для оцінювання хімічного, токсикологічного і біологічного стану вод.

Саме поєднання цих трьох вимірів створює потребу у компенсаційному контурі моніторингу. Дані ДЗЗ не усувають аналітичну прогалину повністю, оскільки не замінюють лабораторні вимірювання, але суттєво зменшують просторову і часову невизначеність. Це особливо важливо для великих водних об'єктів, водосховищ, заплавлених територій і прибережних зон, де наземний контроль є точковим і не завжди репрезентує просторову неоднорідність стану водної поверхні.

Перевага Sentinel-2 у кризових умовах полягає у незалежності від фізичного доступу до берегової лінії та можливості аналізувати не окрему точку, а всю водну поверхню в межах сцени. Це дозволяє виявляти просторову неоднорідність, яку неможливо зафіксувати лише точковими польовими вимірюваннями.

Sentinel-2 є особливо придатним для завдань, де потрібна регулярна просторова інформація: зміна площі водного дзеркала, формування нових руслових елементів, поява оголених донних відкладів, поширення каламутних шлейфів, динаміка прибережної рослинності та розвиток потенційних евтрофікаційних процесів [13–17]. Для кризового моніторингу принципово важливо розмежувати дві функції супутникових даних. Перша функція є доказовою для просторових змін водної поверхні, якщо забезпечено коректну попередню обробку і порівнянність сцен. Друга функція є індикативною для якості води, оскільки індекси каламутності та хлорофілу потребують калібрації за наземними даними.

Узагальнення відповідності можливостей Sentinel-2 основним завданням кризового моніторингу поверхневих вод наведено в таблиці 1.

Каховська катастрофа є релевантним прикладом для демонстрації компенсаційної ролі Sentinel-2, оскільки масштаб змін значно перевищував можливості оперативного наземного обстеження. Після руйнування греблі відбулися швидке спрацювання водосховища, експозиція донних відкладів, трансформація руслового ландшафту і зміни умов існування прибережних екосистем [7, 8]. Подібний підхід до картографування просторово-часових трансформацій ложа колишнього Каховського водосховища за даними Sentinel-2 уже застосовано у спеціалізованому дослідженні українських авторів [25].

Зіставлення мультиспектральних сцен до і після 6 червня 2023 року дає змогу візуально ідентифікувати масштабну зміну водного дзеркала. На сцені Sentinel-2 L2A від 25.05.2023 водосховище ще зберігає суцільну водну поверхню (рис. 1).

На сцені від 25.06.2023 фіксується майже повне спрацювання водосховища, оголення значних площ донних відкладів, поява залиш-

Таблиця 1

Відповідність можливостей Sentinel-2 завданням кризового моніторингу поверхневих вод

Table 1

Correspondence between Sentinel-2 capabilities and emergency surface water monitoring tasks

Завдання моніторингу	Придатність Sentinel-2	Основні індикатори	Ключове обмеження
Картографування водної поверхні та зон затоплення	Висока	NDWI, MNDWI, водна маска	Хмарність, тіні, мілководдя, змішані пікселі
Виявлення висихання або спрацювання водосховищ	Висока	Різницеві карти NDWI, часові ряди	Потрібні коректна межа АОІ та порівнянні умови зйомки
Оцінювання відносної каламутності	Середня-висока	NDTI, червоний і Red Edge канали	Необхідна калібрація за польовими вимірюваннями
Індикація потенційної евтрофікації / chlorophyll-a	Середня	NDCI, Red Edge канали	Змішування сигналу хлорофілу, завислих речовин і донного відбиття
Виявлення важких металів, нітратів, токсичних органічних сполук	Низька / непряма	Оптичні аномалії лише як допоміжна ознака	Потрібен лабораторний аналіз
Формування управлінських звітів	Висока як інформаційна підтримка	Карти, часові ряди, джерельно прив'язані звіти	Звітність не є метрологічною валідацією даних



Рис. 1 – Sentinel-2 L2A, зона Каховського водосховища до руйнування греблі, 25.05.2023, режим True color. Джерело: Copernicus Browser

Fig. 1 – Sentinel-2 L2A, Kakhovka Reservoir area before dam destruction, 25 May 2023, True color mode. Source: Copernicus Browser

кових водойм і формування нового руслового ландшафту (Рис. 2). Таке зіставлення демонструє цінність супутникових даних саме як оперативного компенсаційного джерела просторової інформації за умов, коли безпечний наземний доступ до значної частини території відсутній.

Додаткову інтерпретаційну цінність має NDWI-візуалізація після аварійної сцени (рис. 3). NDWI контрастно виділяє водну поверхню на фоні суходолу, що дозволяє локалізувати залишкові водні масиви, заболочені ділянки та нові руслові елементи. У кризовому моніторингу така інформація може бути використана



Рис. 2 – Sentinel-2 L2A, зона Каховського водосховища після руйнування греблі, 25.06.2023, режим True color. Джерело: Copernicus Browser

Fig. 2 – Sentinel-2 L2A, Kakhovka Reservoir area after dam destruction, 25 June 2023, True color mode. Source: Copernicus Browser

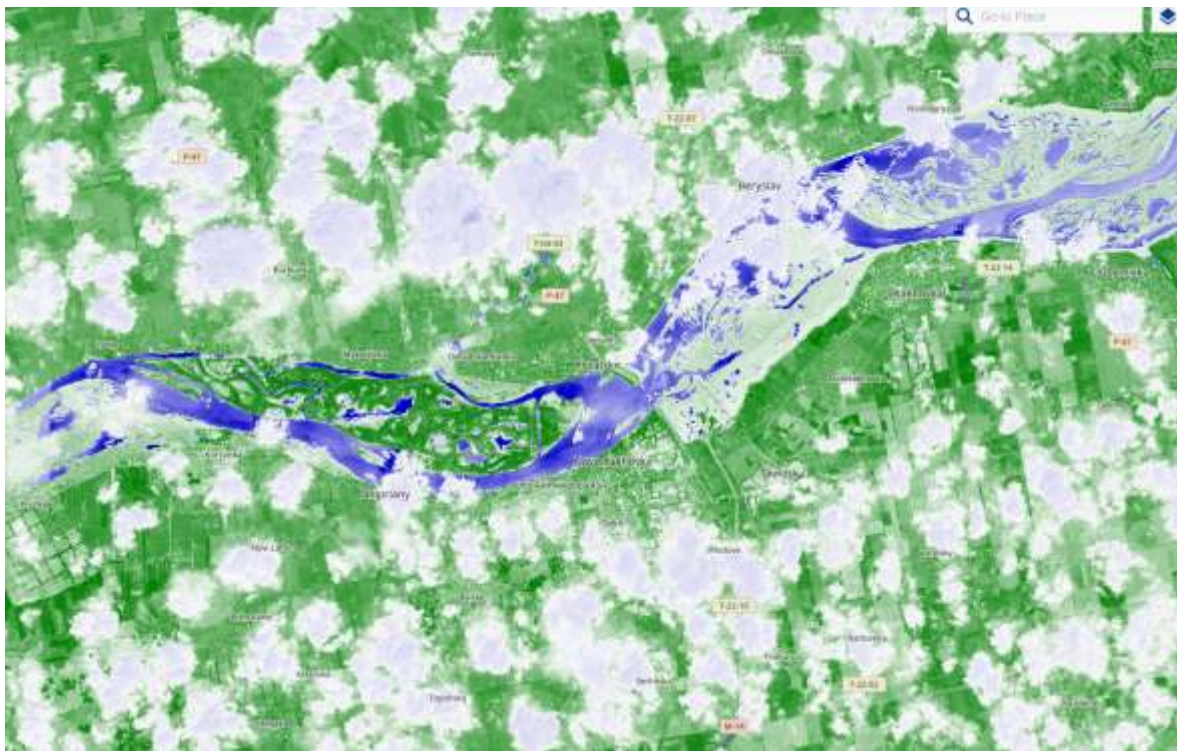


Рис. 3 – Візуалізація NDWI зони Каховського водосховища після руйнування греблі, 25.06.2023. Джерело: Copernicus Browser

Fig. 3 – NDWI visualization of the Kakhovka Reservoir area after dam destruction, 25 June 2023. Source: Copernicus Browser

для попередньої пріоритизації ділянок польового обстеження, планування відбору проб і зіставлення з офіційними або лабораторними даними, якщо вони стають доступними.

Водночас наведений кейс не слід трактувати як повну екологічну оцінку наслідків катастрофи. Сцени Sentinel-2 дозволяють фіксувати просторову трансформацію водного об'єкта, але для оцінювання вторинного забруднення, вивільнення металів, токсичних органічних сполук, біогенних елементів і мікробіологічних ризиків потрібне поєднання супутникових даних із лабораторними дослідженнями води та донних відкладів, гідрологічним моделюванням і офіційними даними моніторингу [8, 9]. Саме тому Sentinel-2 у запропонованій моделі розглядається не як заміна наземного контролю, а як компенсаційний просторово-часовий контур, який допомагає зменшити невизначеність у період обмеженого доступу.

Індексний аналіз є одним із найпростіших і найбільш відтворюваних способів отримання первинної інформації із супутникових сцен. Його перевага полягає у прозорості обчислень, можливості порівняння дат і просторовій інтерпретованості результатів. Для кризового моніторингу поверхневих вод доцільно розглядати індекси не як самодостатні екологічні показники, а як інструменти попереднього виявлення змін.

NDWI є найбільш релевантним для виділення водної поверхні, визначення залишкових водойм, зон затоплення або висихання. У випадку Каховського водосховища він дозволяє відокремити залишкові водні масиви від оголених донних відкладів і суходолу. NDTI може використовуватися для просторового скринінгу відносної каламутності, зокрема у випадках переміщення завислих речовин після паводків, руйнування гідротехнічних споруд або аварійних скидів. NDCI доцільно застосовувати для попередньої індикації потенційної евтрофікації, однак його інтерпретація є складнішою через можливе змішування сигналів хлорофілу-а, завислих речовин, кольорової розчиненої органічної речовини та донного відбиття на мілководдях.

Отже, у компенсаційному контурі моніторингу індекси виконують функцію просторового фільтра ризику. Вони дозволяють визначити ділянки, які потребують пріоритетної уваги, але не дають підстав для остаточних висновків про хімічну або токсикологічну якість води без лабораторної валідації.

Машинне навчання може підвищити ефективність обробки великих масивів супутникових даних, але його застосування потребує чітко визначеної навчальної вибірки, експертної розмітки, незалежної валідації та порівняння з базовими алгоритмами. У межах запропонованої системи Vision Transformer розглядається як перспективний інструмент сегментації мультиспектральних сцен, а не як уже верифікована модель для всіх водних об'єктів України [22, 23].

Потенційні класи сегментації можуть включати відкриту воду, каламутну воду, вологі донні відклади, суходіл, прибережну рослинність, хмарність і тіні. Практичне застосування такої моделі потребує формування репрезентативного набору сцен для різних сезонів, типів водойм, гідрологічних умов і регіонів України. Обов'язковими є метрики точності, зокрема overall accuracy, F1-score, intersection over union для класів водної поверхні та перевірка переносимості моделі на нові ділянки.

Retrieval-Augmented Generation доцільно використовувати не для первинного визначення екологічного стану, а для контролюваного формування звітів. RAG-модуль може зв'язувати карти, індекси, часові ряди, нормативні документи та наукові джерела, зменшуючи ризик непідтверджених текстових узагальнень [24]. Водночас він не замінює валідацію супутникових продуктів і не підвищує метрологічну точність самих вимірювань. Його функція полягає у прозорому документуванні, відтворюваній логіці посилань і підтримці підготовки управлінських матеріалів.

Концептуальну архітектуру інтегрованої системи дистанційного моніторингу поверхневих вод подано на рис. 4.

Запропонований підхід має практичне значення для кількох рівнів екологічного управління. На оперативному рівні Sentinel-2 може використовуватися для швидкого виявлення масштабних змін водної поверхні, затоплення, висихання, формування каламутних шлейфів і зміни берегової лінії. На тактичному рівні індексні карти можуть допомагати пріоритизувати польові обстеження та визначати ділянки, де відбір проб матиме найбільшу інформаційну цінність. На стратегічному рівні часові ряди супутникових даних можуть підтримувати відновлення системи моніторингу у повоєнний період, коли наземна інфраструктура ще не буде повністю відновлена.

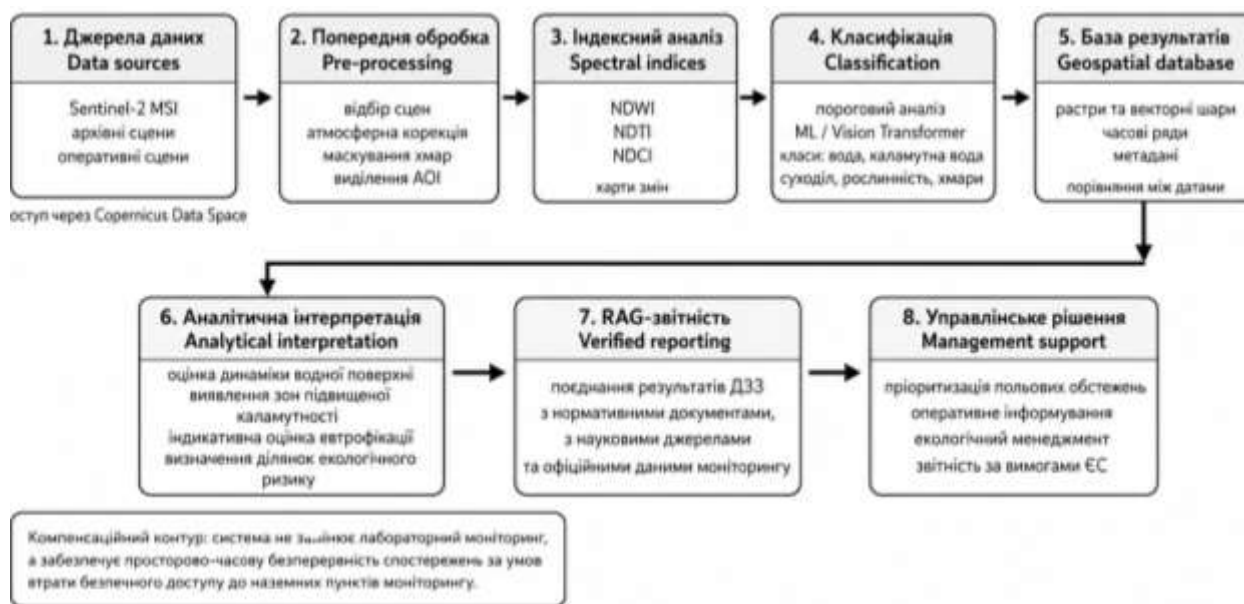


Рис. 4 – Схема інтегрованої системи компенсаторного моніторингу поверхневих вод на основі Sentinel-2, індексного аналізу, машинного навчання та контрольованої звітності

Fig. 4 – Scheme of the integrated compensatory surface water monitoring system based on Sentinel-2, spectral index analysis, machine learning and controlled reporting

Важливо, що компенсаторний контур не повинен протиставлятися традиційному лабораторному моніторингу. Навпаки, найбільш ефективною є інтегрована модель, у якій супутникові дані забезпечують просторову повноту і регулярність спостережень, а

лабораторні вимірювання забезпечують метрологічну достовірність і нормативну інтерпретацію якості води. Такий підхід відповідає сучасній логіці екологічного моніторингу, де різні джерела даних не замінюють, а доповнюють одне одного.

Умови інтерпретації та подальшого уточнення результатів

Інтерпретація супутникових даних потребує врахування умов знімання та спектральних властивостей досліджуваних поверхонь. По-перше, Для Sentinel-2 важливими є хмарність, наявність диму або серпанку, кут освітлення, стан атмосфери, хвилювання водної поверхні та сезонна динаміка рослинності. У ситуаціях, коли оптичні знімки мають недостатню придатність через хмарність, доцільним є залучення радіолокаційних даних Sentinel-1, які можуть доповнювати оптичні спостереження під час кризового картографування [4, 26].

По-друге, NDWI, NDTI і NDCI є спектральними індикаторами, а не прямими лабораторними вимірюваннями. Вони дозволяють виявляти просторові аномалії та пріоритетні ділянки, однак для кількісного визначення концентрацій речовин потребують калібрації і незалежної перевірки [13–17].

По-третє, Sentinel-2 не дає прямої інформації про важкі метали, нафтопродукти,

мікробіологічні показники або токсичні органічні сполуки. Для таких параметрів супутниковий аналіз може виконувати лише функцію просторової пріоритизації, тоді як остаточні висновки мають ґрунтуватися на лабораторному контролі. Загальноєвропейські оцінки стану поверхневих вод також підтверджують, що навіть за наявності розвинених систем моніторингу досягнення доброго екологічного стану водних масивів залишається складним управлінським завданням [27].

По-четверте, застосування моделей машинного навчання потребує окремої процедури навчання і валідації. Без опису датасету, розмітки, метрик точності та порівняння з базовими алгоритмами такі моделі мають розглядатися як перспективний елемент архітектури, а не як доведений емпіричний результат.

По-п'яте, результати аналізу Каховського водосховища доцільно розглядати відповідно до мети цієї роботи – як основу для просторового простеження трансформації водного об'єкта та змін поверхневого покриття за

даними Sentinel-2. Детальне оцінювання площі водної поверхні, об'єму води, складу донних відкладів або концентрацій забруднювачів є окремим напрямом досліджень і

потребує спеціалізованих розрахункових процедур, гідрологічного моделювання та лабораторного контролю.

Висновки

Повномасштабна війна спричинила системне порушення наземного екологічного моніторингу поверхневих вод України. Ключовими чинниками є втрата безпечного доступу до пунктів спостереження, пошкодження інфраструктури, мінна небезпека, порушення логістики польових робіт і обмеження лабораторного контролю.

Прогалина екологічних даних має просторовий, часовий та аналітичний виміри. Саме їх поєднання створює потребу у компенсаційному контурі моніторингу, здатному підтримувати регулярне спостереження без фізичної присутності оператора на місці.

Sentinel-2 є обґрунтованим джерелом компенсаційної просторово-часової інформації для кризового моніторингу поверхневих вод. Його головна роль полягає у картографуванні водної поверхні, виявленні змін берегової лінії, зон затоплення або висихання, попередній індикації каламутності та визначенні ділянок для подальшої польової перевірки.

На прикладі Каховського водосховища показано, що сцени Sentinel-2 L2A до і після руйнування греблі дозволяють фіксувати масштабну трансформацію водного об'єкта: спрацювання водосховища, оголення донних

відкладів, формування залишкових водойм і нових руслових елементів. NDWI-візуалізація підсилює інтерпретацію таких змін завдяки контрастному виділенню водної поверхні.

NDWI, NDTI і NDCI доцільно використовувати як інструменти первинного скринінгу, а не як заміну лабораторних показників. Для переходу від спектральних індикаторів до кількісних концентрацій речовин потрібні польові вимірювання, калібрація і незалежна валідація.

Інтелектуальна аналітика має допоміжну, а не заміну функцію. Vision Transformer може використовуватися для автоматизованої сегментації сцен після належного навчання і валідації, а RAG – для контрольованого формування звітів із прив'язкою до джерел, але не для валідації екологічних вимірювань.

Найбільш перспективною для України є інтегрована модель моніторингу, у якій ДЗЗ забезпечує просторово-часовий скринінг і раннє виявлення змін, машинне навчання підтримує обробку великих масивів даних, контрольована звітність забезпечує прозоре документування, а наземний лабораторний контроль залишається основою метрологічно підтвердженої оцінки якості вод.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Автор повністю дотримувався етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Декларація про використання ШІ

Під час підготовки рукопису використано інструменти генеративного штучного інтелекту ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) для мовного редагування та структурування окремих фрагментів. Штучний інтелект не використовувався для створення первинних наукових даних, лабораторних результатів або неперевіраних емпіричних висновків. Автор перевіряв фактичні твердження, джерела та висновки і несе повну відповідальність за зміст рукопису.

Список використаної літератури

1. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities. 2000. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CElex:32000L0060>
2. WHO Guidelines for drinking-water quality. 4th edition, incorporating the 1st and 2nd addenda. Geneva: World Health Organization, 2022. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
3. Водний кодекс України від 06.06.1995 № 213/95-ВР. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр>
4. Policy and technical brief on use of Earth observations to assess ecosystems damage in Ukraine. UNECE. 2024. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2024->

- [05/Policy%20and%20technical%20brief%20on%20use%20of%20Earth%20observations%20to%20assess%20ecosystems%20damage%20in%20Ukraine.pdf](#)
5. Екологічні наслідки руйнування Каховської греблі під час війни в Україні. Національна академія наук України. URL: <https://www.nas.gov.ua/news/kahovska-katastrofa-matime-viddaleni-ekologichni-naslidki>
 6. Широкомасштабне забруднення, засмічення та опріснення Чорного моря. RAC/SPA. 2024. URL: <https://rac.org.ua/wp-content/uploads/2024/06/racse-kahovka-resume-ukr-2024.pdf>
 7. Spears B. M., Harpham Q., Brown E. et al. A rapid environmental risk assessment of the Kakhovka Dam breach during the Ukraine conflict. *Nature Ecology & Evolution*. 2024. Vol. 8. P. 834–836. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02373-0>
 8. Shumilova O. et al. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*. 2025. Vol. 387. P. 1181–1186. <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>
 9. Jiang D., Khokhlov V., Tuchkovenko Y. et al. The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. *Communications Earth & Environment*. 2025. Vol. 6. Article 185. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02153-z>
 10. Sentinel-2. European Space Agency. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2
 11. Sentinel-2 Documentation. Copernicus Data Space Ecosystem. URL: <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html>
 12. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.014>
 13. Gholizadeh M. H., Melesse A. M., Reddi L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*. 2016. Vol. 16, Iss. 8. Article 1298. <https://doi.org/10.3390/s16081298>
 14. Goodrich S., Schaeffer B., Meyers K. et al. Sentinel-2 for chlorophyll-a water quality monitoring: A review of validation evidence and application potential. *International Journal of Remote Sensing*. 2026. <https://doi.org/10.1080/01431161.2026.2637851>
 15. Tian S., Guo H., Xu W. et al. Remote sensing retrieval of inland water quality parameters using Sentinel-2 and multiple machine learning algorithms. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 18617–18630. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23431-9>
 16. Toming K., Kutser T., Laas A., Sepp M., Paavel B., Nõges T. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8, Iss. 8. Article 640. <https://doi.org/10.3390/rs8080640>
 17. Chowdhury M., Vilas C., van Bergeijk S., Navarro G., Laiz I., Caballero I. Monitoring turbidity in a highly variable estuary using Sentinel 2-A/B for ecosystem management applications. *Frontiers in Marine Science*. 2023. Vol. 10. Article 1186441. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1186441>
 18. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17, Iss. 7. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
 19. Xu H. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, Iss. 14. P. 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
 20. Bid S., Siddique G. Identification of seasonal variation of water turbidity using NDTI method in Panchet Hill Dam, India. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2019. Vol. 5. P. 1179–1200. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00609-8>
 21. Mishra S., Mishra D. R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 117. P. 394–406. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>
 22. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A. et al. An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. *ICLR 2021*. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.11929>
 23. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N. et al. Attention is All You Need. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. Vol. 30. URL: <https://arxiv.org/abs/1706.03762>
 24. Lewis P., Perez E., Piktus A. et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020. Vol. 33. P. 9459–9474. URL: <https://arxiv.org/abs/2005.11401>
 25. Lischenko L., Kozlova A., Andreiev A. Mapping of the spatiotemporal transformations of the former Kakhovka reservoir bed after dam destruction using Sentinel-2 satellite imagery. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2025. Vol. 12, Iss. 4. P. 29–37. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.4.296>
 26. Copernicus Emergency Management Service. European Union. URL: <https://emergency.copernicus.eu/>
 27. European waters — Assessment of status and pressures 2021. European Environment Agency. 2021. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/european-waters-assessment-2021>

Стаття надійшла до редакції 11.04.2026
Стаття рекомендована до друку 15.05.2026

Переглянуто 10.05.2026
Опубліковано 30.05.2026

V. O. MAKSYMENKO,

PhD Student at the Department of Environmental Monitoring
and Protected Area Management

e-mail: maksymenko.vladyslav.o@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5525-2438>

V. N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

USE OF SENTINEL-2 DATA FOR COMPENSATORY MONITORING OF SURFACE WATERS OF UKRAINE UNDER MARTIAL LAW

Purpose. To substantiate the use of Sentinel-2 data as a compensatory component of surface water environmental monitoring in Ukraine under martial law.

Methods. The study has a conceptual and analytical design and combines structural-functional analysis of the traditional surface water monitoring system, comparative assessment of contact-based and satellite-based observation methods, analysis of the EU Water Framework Directive, technical interpretation of Sentinel-2 MSI capabilities and a demonstration analysis of satellite scenes of the Kakhovka Reservoir area.

Results. Sentinel-2 L2A scenes acquired before and after the destruction of the Kakhovka Dam were used to illustrate the compensatory potential of Earth observation, including True color visualizations and NDWI mapping for the identification of residual water bodies and transformed channel elements. Three main dimensions of the wartime environmental data gap were identified: spatial, temporal and analytical. Sentinel-2 cannot replace laboratory water quality monitoring, but it can support regular spatial-temporal screening of large water bodies, operational detection of water surface changes, mapping of flooding or drying areas, preliminary indication of turbidity-related anomalies and prioritization of sites for field validation. The Kakhovka Reservoir case demonstrates that satellite scenes make it possible to document large-scale transformation of a water body after the loss of safe ground access, including reservoir drawdown, exposure of bottom sediments and formation of residual water bodies.

Conclusions. The most scientifically justified model for wartime and post-war conditions is an integrated monitoring system in which Sentinel-2 acts as a compensatory spatial-temporal observation contour, spectral index analysis provides primary change detection, machine learning may support automated classification of scenes after proper validation, and laboratory monitoring remains the basis for metrologically confirmed water quality assessment.

KEYWORDS: *environmental monitoring, surface waters, Sentinel-2, Earth observation, martial law, NDWI*

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author has fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

AI Statement

Generative artificial intelligence tools ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) were used to edit and structure the manuscript. Artificial intelligence was not used to generate primary scientific data, laboratory results, or unverified empirical conclusions. The author has verified the factual statements, sources, and conclusions and bears full responsibility for the content of the manuscript.

References

1. European Parliament & Council of the European Union. (2000). Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CElex:32000L0060>
2. World Health Organization. (2022). Guidelines for drinking-water quality (4th ed., incorporating the 1st and 2nd addenda). Retrieved from <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
3. Verkhovna Rada of Ukraine. (1995). Water Code of Ukraine. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр> Retrieved from (in Ukrainian)
4. United Nations Economic Commission for Europe. (2024). Policy and technical brief on use of Earth observations to assess ecosystems damage in Ukraine. Retrieved from <https://unece.org/sites/default/files/2024-05/Policy%20and%20technical%20brief%20on%20use%20of%20Earth%20observations%20to%20assess%20ecosystems%20damage%20in%20Ukraine.pdf>
5. National Academy of Sciences of Ukraine. (2023). Ecological consequences of the destruction of the Kakhovka dam during the war in Ukraine. Retrieved from <https://www.nas.gov.ua/news/kahovska-katastrofa-matime-viddalenie-ekologichni-naslidki> (in Ukrainian)

6. Regional Activity Centre for Specially Protected Areas. (2024). Large-scale pollution, littering and desalination of the Black Sea. Retrieved from <https://rac.org.ua/wp-content/uploads/2024/06/racse-kahovka-resume-ukr-2024.pdf> (in Ukrainian)
7. Spears, B. M., Harpham, Q., Brown, E., et al. (2024). A rapid environmental risk assessment of the Kakhovka Dam breach during the Ukraine conflict. *Nature Ecology & Evolution*, 8, 834–836. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02373-0>
8. Shumilova, O., et al. (2025). Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*, 387, 1181–1186. <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>
9. Jiang, D., Khokhlov, V., Tuchkovenko, Y., et al. (2025). The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. *Communications Earth & Environment*, 6, 185. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02153-z>
10. European Space Agency. Sentinel-2. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2
11. Copernicus Data Space Ecosystem. Sentinel-2 documentation. Retrieved from <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html>
12. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., et al. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.014>
13. Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., & Reddi, L. A. (2016). A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*, 16(8), 1298. <https://doi.org/10.3390/s16081298>
14. Goodrich, S., Schaeffer, B., Meyers, K., et al. (2026). Sentinel-2 for chlorophyll-a water quality monitoring: A review of validation evidence and application potential. *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431161.2026.2637851>
15. Tian, S., Guo, H., Xu, W., et al. (2023). Remote sensing retrieval of inland water quality parameters using Sentinel-2 and multiple machine learning algorithms. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 18617–18630. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23431-9>
16. Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B., & Nöges, T. (2016). First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. *Remote Sensing*, 8(8), 640. <https://doi.org/10.3390/rs8080640>
17. Chowdhury, M., Vilas, C., van Bergeijk, S., Navarro, G., Laiz, I., & Caballero, I. (2023). Monitoring turbidity in a highly variable estuary using Sentinel 2-A/B for ecosystem management applications. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1186441. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1186441>
18. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
19. Xu, H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
20. Bid, S., & Siddique, G. (2019). Identification of seasonal variation of water turbidity using NDTI method in Panchet Hill Dam, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5, 1179–1200. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00609-8>
21. Mishra, S., & Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394–406. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>
22. Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., et al. (2021). An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. *ICLR 2021*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2010.11929>
23. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., et al. (2017). Attention Is All You Need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1706.03762>
24. Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., et al. (2020). Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 9459–9474. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2005.11401>
25. Lischenko, L., Kozlova, A., & Andreiev, A. (2025). Mapping of the spatiotemporal transformations of the former Kakhovka reservoir bed after dam destruction using Sentinel-2 satellite imagery. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 12(4), 29–37. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.4.296>
26. European Union. Copernicus Emergency Management Service. Retrieved from <https://emergency.copernicus.eu/>
27. European Environment Agency. (2021). European waters – Assessment of status and pressures 2021. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/publications/european-waters-assessment-2021>

The article was received by the editors 11.04.2026
The article is recommended for printing 15.05.2026

The article was revised 10.05.2026
This article published 30.05.2026